

焦炉配煤专家系统的定性定量 综合设计方法¹⁾

阳春华 沈德耀 吴敏 刘健勤

(中南工业大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

(E-mail: ychh@mail.csut.edu.cn)

摘要 焦炉配煤炼焦过程是存在诸多不确定性、无法用数学模型描述的复杂工业过程,传统控制方法难以实施控制。根据焦化理论和生产所获工业数据构造数学模型,以群体专家经验得到的定性知识构成规则模型,将解析的数学模型与基于知识的规则模型相结合,采用定性定量综合集成方法,建立焦炭质量预测模型,提出了配煤比计算的实用算法,并实时控制配煤流量。系统于1994年正式投入工厂运行,焦炭质量预测精度达到95%,配煤准确率达到97%。工业运行结果证明了方法的有效性。

关键词 定性定量综合,专家系统,焦炭质量预测,配煤比计算。

SYNTHESIS OF QUALITATIVE AND QUANTITATIVE METHODS IN A COAL BLENDING EXPERT SYSTEM FOR COKE OVEN

YANG Chunhua SHEN Deyao WU Min LIU Jianqin

(College of Information Science & Engineering, Central South University of Technology, Changsha 410083)

Abstract The coal blending and coking process, in which much uncertainty exists, is too complicated to describe with mathematical models, and it can not be controlled properly by traditional methods. According to the coking theory and using statistical data acquired from industry processes, a mathematical model is designed and a rule model is proposed with qualitative knowledge derived from experts' experience. The rule model is combined with the mathematical model, and qualitative and quantitative methods are integrated to build up a model for prediction of coke quality and to compute the blending ratio of coal. Furthermore the flow of each kind of coal is controlled. Since 1994 the system has been running in a plant with accuracy of coal blending and prediction precision of coke quality up to 97% and 95%, respectively.

Key words Synthesis of qualitative and quantitative methods, expert system, coke quality prediction, calculation of blending ratio of coal.

1) 国家高技术研究发展计划(八六三计划)资助项目。

收稿日期 1998-09-17 收修改稿日期 1999-02-11

1 引言

随着科学技术的突飞猛进,对工业过程控制的要求越来越高,需要控制的工业过程日趋复杂,过程中严重的非线性和不确定性,使许多系统无法用数学模型精确描述,这样建立在数学模型基础上的传统控制方法在实际应用中遇到了许多难以逾越的障碍.专家控制作为一种智能控制,将人的感性经验和定理算法结合,能够处理各种定性的与定量的、精确的与模糊的信息^[1],为从定性到定量的综合集成技术提供了实现手段.自瑞典学者 Astrom K J^[2]提出专家控制的概念以来,鉴于它所表现出来的在层次结构上、控制方法上和知识表达上的灵活性,受到了控制界特别关注;在冶金、冶炼、化工等行业的复杂工业生产过程控制中,专家控制系统已获得了成功应用^[3~5].

在钢铁工业生产中,高炉用焦炭要求灰分低、含硫少、强度大、各向异性程度高,以及高炉大型化和高压喷吹技术的发展,对焦炭质量的要求越来越严格,采用合适的配煤比进行配煤炼焦,既可保证焦炭质量,又可合理利用煤炭资源.但配煤炼焦过程是一个发生了一系列物理和化学变化、影响焦炭质量因素众多的复杂工业生产过程,很难用数学模型来描述各单种煤质量、配煤比与配合煤质量、焦炭质量之间的关系.若采用传统的方法来计算配煤比是非常困难的,然而对于这种难以用数学模型描述的复杂对象,综合集成是智能系统在解决实用问题方面很有成效的一种途径^[6],本文以焦炉配煤专家系统作为应用对象,对定性定量综合的智能控制算法进行了探讨.

2 专家控制系统总体设计

一钢铁公司配煤生产过程共有7个配煤槽,煤槽中的单种煤随着圆盘的转动传送到输送皮带上,混合均匀后送往焦炉炼焦.各单种煤的配煤比是由工程技术人员根据煤的质量、炼焦环境以及长期的运行经验来计算,采用小焦炉试验验证,经过多次反复才能确定.由于煤种多、成分变化等原因,人工计算配煤比工作量大、准确性不高,并且计算、验证的周期长,即使计算出了配煤比,也由于采用人工刮板式配煤,各单种煤流量大小由操作人员凭经验调节套筒和挡板的位置来控制.配煤比计算和实际配煤流量的不准确,很难保证配合煤的质量,也无法保证配煤效率,故建立具有焦炭质量预测、配煤比计算、配煤流量控制功能的两级结构专家控制系统(ECS).

上一级专家系统(ES)基于配煤生产工艺和长期配煤的经验知识,根据给定的焦炭质量指标和各单种煤的质量指标,运用定性定量综合的智能控制算法,求得各单种煤配比,并运用焦炭质量预测模型预测焦炭质量以验证配煤比的准确性.ES由信息获取与处理单元、知识库、推理机构、综合信息处理机构组成,图1中, E 为对采样信息处理后的全体特征状态的集合; R 是系统的知识项集,为经过事先总结的领域专家知识; Q 为定性映射控制模态集合; U 是ES的输出集,为定量映射的控制量集合.ES根据输入信息 E 和知识 R 进行推理,然后根据推理结果 Q 输出相应的控制量 U ,式(1)所示为ES的具有定性定量结合的二次映射关系的信息处理与决策过程^[7].

$$\left. \begin{aligned}
 &R: E \rightarrow Q, R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}, Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}, \\
 &R_i: \text{IF } e_i \text{ THEN } q_i, E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}, (\text{定性映射}), \\
 &Q: X \xrightarrow{F} U, X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}, U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}, \\
 &q_i: u_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_m), (\text{定量映射}).
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ES 的输出集 U 为各单种煤的配比, 作为下一级集散控制系统(DCS)的控制目标值. DCS 实时监视生产过程、实时管理生产过程数据, 由7个控制器实现各配煤槽配煤流量的控制, 完成各配煤槽圆盘给料机的自动起动与自动停止. DCS 还具备实时故障报警与多级后备, 历史趋势曲线、报表的打印与显示功能. 系统结构如图1所示.

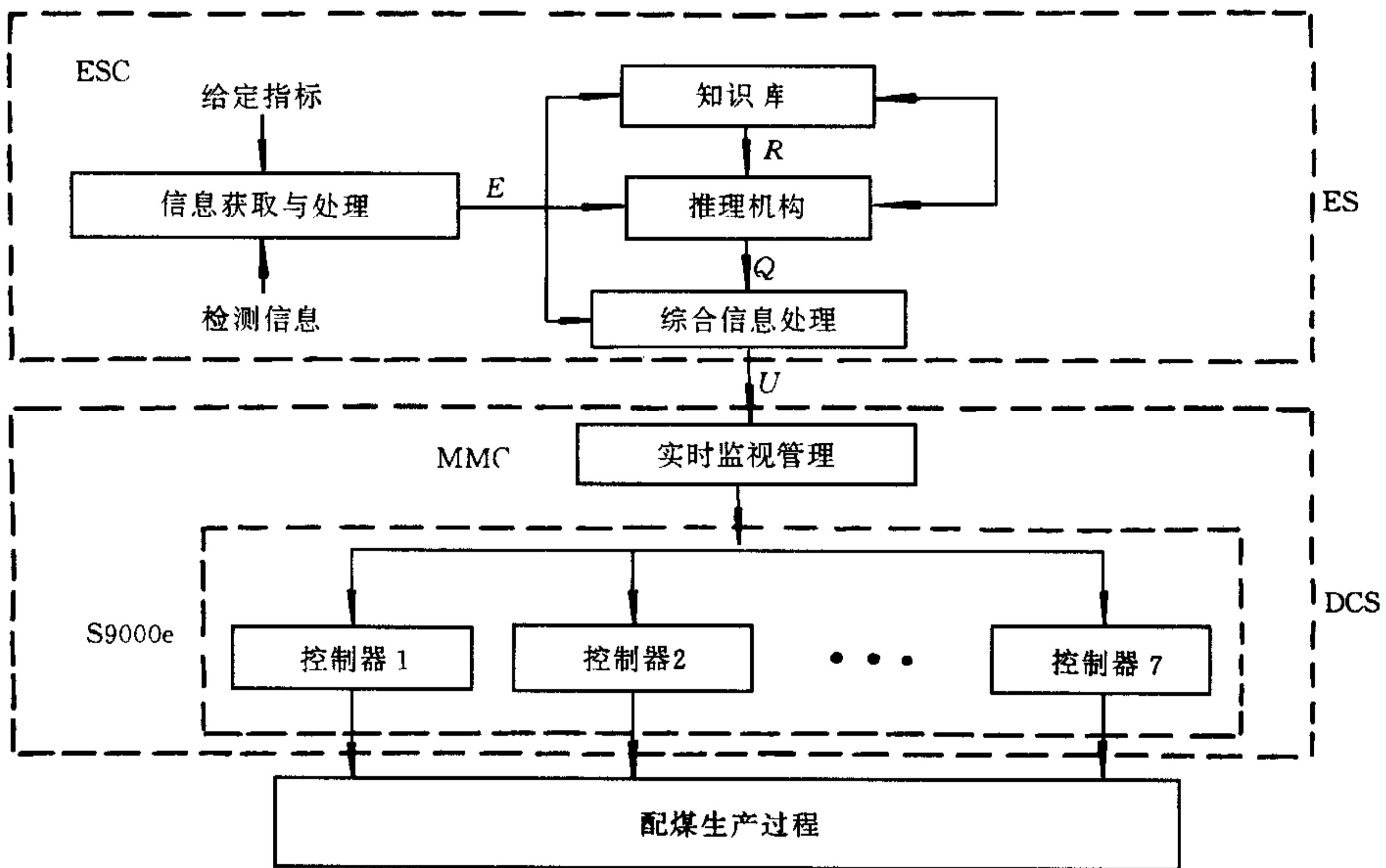


图1 专家控制系统结构

3 焦炭质量预测模型

焦炭抗碎强度 M_{40} 、耐磨强度 M_{10} 、硫分 S_Q^g 和灰分 A^g 直接影响高炉炼铁效果, 配合煤的粘结性指数 G 、挥发分 V_p^r 、硫分 S_{Qp}^g 和灰分 A_p^g 影响焦炭性能, 而配合煤由单种煤混合形成, 其质量指标取决于各单种煤的质量指标和配合比. 因此, 预测焦炭质量分两步进行: 首先根据配煤槽中各单种煤质量指标和配比, 预测配合煤质量; 再由配合煤质量预测焦炭质量.

3.1 配合煤质量预测

从单种煤到配合煤的过程只发生了物理变化, 由单种煤质量指标与配比的加和性运算可预测配合煤质量. 设配合煤是由 N 种单种煤混合而成, m_i 是第 i 种煤的配比, 其粘结性指数为 G_i 、挥发分为 V_{di} 、硫分为 S_{Qdi}^g 、灰分为 A_{di}^g . 则配合煤质量指标为

$$G = \sum_{i=1}^N m_i G_i + \Delta G, V_p^r = \sum_{i=1}^N m_i V_{di}^r + \Delta V, \quad (2a)$$

$$S_{Qp}^g = \sum_{i=1}^N m_i S_{Qdi}^g + \Delta S, A_p^g = \sum_{i=1}^N m_i A_{di}^g + \Delta A, \quad (2b)$$

式中, $\Delta G, \Delta V, \Delta S, \Delta A$ 为粘结性指数、挥发分、硫分和灰分的校正值, 避免煤种、煤质变化时, 加和性所带来的偏差, 若定义

$$D = \begin{bmatrix} G_1 & G_2 & \cdots & G_n \\ V_{d1}^r & V_{d2}^r & \cdots & V_{dN}^r \\ S_{Qd1}^g & S_{Qd2}^g & \cdots & S_{QdN}^g \\ A_{d1}^g & A_{d2}^g & \cdots & A_{dN}^g \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \cdots \\ m_N \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} G \\ V_p^r \\ S_{Qp}^g \\ A_p^g \end{bmatrix}, \Delta P = \begin{bmatrix} \Delta G \\ \Delta V \\ \Delta S \\ \Delta A \end{bmatrix},$$

则式(2)可表示为

$$P = DM + \Delta P, \quad (3a)$$

第 $k+1$ 次预测误差为第 k 次预测值 $P(k)$ 与实际值 $P_A(k)$ 之差

$$\Delta P(k+1) = P(k) - P_A(k). \quad (3b)$$

在第1次预测时, 选择一组经验校正值 $\Delta G_0, \Delta V_0, \Delta S_0, \Delta A_0$ 形成 $\Delta P(1)$, 则有

$$\Delta P(k+1) = \sum_{n=1}^k [D(n)M(n) - P_A(n)] + \Delta P(1), \quad (4a)$$

$$P(k+1) = D(k+1)M(k+1) + \Delta P(k+1), \quad (4b)$$

式(4)组成了配合煤质量预测模型.

3.2 焦炭质量预测

灰分是惰性物质, 在结焦过程中被完全的保留下来, 硫分受热分解, 约有25%~35%的硫分解成挥发物析出, 故有

$$A^g = \frac{1}{\eta_c} A_p^g + \Delta A^g, \quad S_Q^g = \frac{\eta_s}{\eta_c} S_{Qp}^g + \Delta S_Q^g, \quad (5)$$

式中产焦率 $\eta_c = 0.75 \sim 0.80$, 残留系数 $\eta_s = 0.65 \sim 0.75$, $\Delta A^g, \Delta S_Q^g$ 为灰分、硫分的校正值, 其求解方法同式(4)中 ΔP .

影响焦炭强度指标 M_{40}, M_{10} 的主要因素有配合煤的粘结性指标 G 、挥发分 V_p^r , 基于生产过程统计数据, 采用线性回归方法, 确定它们之间的关系

$$M_{40} = a_0 + a_1 G + a_2 V_p^r, \quad M_{10} = b_0 + b_1 G + b_2 V_p^r, \quad (6)$$

式中, $a_i, b_i (i=0, 1, 2)$ 为线性回归系数. 若定义 $y = [M_{40} \quad M_{10}]$, $z = [1 \quad G \quad V_p^r]$,

$$\Phi = \begin{bmatrix} a_0 & b_0 \\ a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix}, \text{ 则式(6)简写为}$$

$$y = z \Phi. \quad (7)$$

从生产统计数据中, 取 n 组独立的数据作为样本数据

$$Z(n) = \begin{bmatrix} z(1) \\ z(2) \\ \vdots \\ z(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & G(1) & V_p^r(1) \\ 1 & G(2) & V_p^r(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & G(n) & V_p^r(n) \end{bmatrix}, \quad Y(n) = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(n) \end{bmatrix},$$

以 J 为目标函数, 求 $\Phi(n)$ 的最小二乘估计值 $\hat{\Phi}(n)$

$$J(n) = \sum_{i=1}^n [y(i) - z(i)\Phi][y(i) - z(i)\Phi]^T, \quad (8)$$

$$\hat{\Phi}(n) = [Z^T(n)Z(n)]^{-1}Z^T(n)Y(n). \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)中即得焦炭强度指标 M_{40} 、 M_{10} 。

4 配煤比的计算

配煤比是根据给定的焦炭质量指标和各单种煤质量指标计算的。由专家系统将焦炭质量预测模型、基于知识的规则模型和解析的数学模型进行综合集成完成配煤比的定量计算。

4.1 知识库的构成

知识库是专家系统的核心,用于存储炼焦配煤过程中经过事先总结的专家水平的知识条目,一部分知识为数据,如配合煤质量预测模型中的粘结性指数、挥发分、硫分和灰分的校正初值,焦炭质量预测模型中的灰分、硫分的校正初值、回归系数等,以框架结构组织在一起,形成数据库。另一部分知识为定性推理知识,采用产生式规则表示,包括由焦炭质量指标确定配合煤质量指标和由配合煤质量指标确定配煤比的推理规则。

焦炭质量指标要求往往以不等式形式出现,若设焦炭质量指标的给定值为 M_{40G} , M_{10G} , S_{QG}^g , A_G^g , 则要求焦炭质量指标满足下式

$$M_{40} \geq M_{40G}, \quad M_{10} \leq M_{10G}, \quad S_Q^g \leq S_{QG}^g, \quad A^g \leq A_G^g. \quad (10)$$

为保证焦炭强度指标 M_{40} 、 M_{10} 能满足要求,由式(6)可知,应寻找配合煤合适的 G 、 V_p^r 值,文献[8]给出了 V_p^r - G 等强度曲线,即 M_{40} 与配合煤的 G 、 V_p^r , M_{10} 与 G 、 V_p^r 之间的关系曲线束。在正常工作范围内, M_{40} 随 G 值增高而增大,随 V_p^r 增大而减小; M_{10} 随 G 值增加而降低,随 V_p^r 增大而上升,故得到由焦炭质量指标确定配合煤质量指标的推理规则

R_1 : IF M_{40} 小于给定指标 M_{40G} OR M_{10} 大于 M_{10G} THEN 增大 G AND 减小 V_p^r ;

R_2 : IF M_{40} 大于 M_{40G} 太多 OR M_{10} 小于 M_{10G} 太多 THEN 减小 G AND 增大 V_p^r 。

焦炭的硫分、灰分与配合煤的硫分、灰分之间存在式(5)所示对应关系,可得到规则

R_3 : IF S_Q^g 大于给定指标值 S_{QG}^g THEN 减小 S_{Qp}^g ;

R_4 : IF A^g 大于给定指标值 A_G^g THEN 减小 A_p^g 。

配合煤质量指标与单种煤质量存在着式(4)所示对应关系,若以 Y 分别代表粘结性指标 G , 挥发份 V_p^r 、硫分 S_{Qp}^g 和灰分 A_p^g , 则可得到由配合煤质量确定配煤比的推理规则

R_5 : IF Y 小于给定指标值 Y_G AND Y_i 大于给定指标值 Y_G THEN 增大 X_i ;

R_6 : IF Y 小于给定指标值 Y_G AND Y_i 小于给定指标值 Y_G THEN 减小 X_i ;

R_7 : IF Y 大于给定指标值 Y_G 太多 AND Y_i 大于给定指标值 Y_G THEN 减小 X_i ;

R_8 : IF Y 大于给定指标值 Y_G 太多 AND Y_i 小于给定指标值 Y_G THEN 增大 X_i 。

4.2 推理过程

配煤比的求取首先根据信息获取单元提供的数据、知识库中的数据库信息和预测模型,进行特征信息处理,获取特征状态,推理机构运用正向链接推理方法将特征状态与推理规则的条件相匹配,如果匹配成功就触发该规则,执行规则的操作部分,鉴于炼焦配煤过程的特点,基于知识的规则给出定性指导,解析模型给出定量操作。求解流程如图2所示。

4.3 定性定量综合确定配煤比

配煤比的确定首先根据给定的焦炭质量指标,确定其对应的配合煤质量指标,再由配

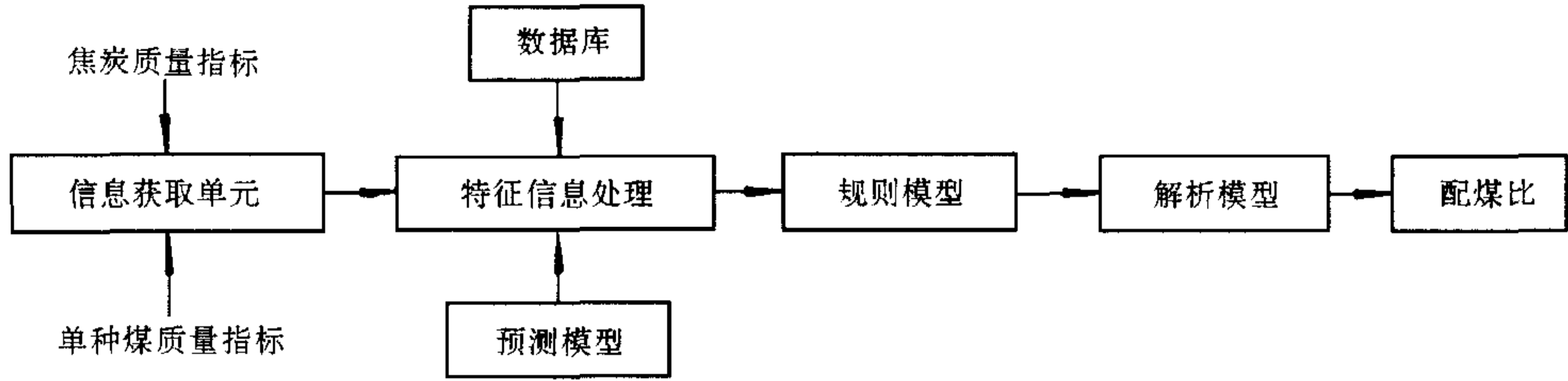


图2 求解流程

合煤质量指标反推计算出配煤比。

由焦炭质量指标确定配合煤质量指标的原则是:取一配合煤质量指标经验值作为初值,根据焦炭质量预测模型(5),(7)式计算 $M_{40}, M_{10}, S_{\text{Q}}^g, A^g$, 判断是否满足(10)式,如不满足,则调整配合煤质量指标,直到满足(10)式为止。调整算法为

$$G_G = G_G + \Delta G_G, \quad V_{PG}^r = V_{PG}^r + \Delta V_{PG}^r. \quad (11)$$

若满足规则 R_1 的条件部分,则 G_G, V_{PG}^r 的调整量分别为

$$\Delta G_{M1} = k_{M1} \frac{M_{40G} - M_{40}}{\hat{a}_1 L} + k_{M2} \frac{M_{10G} - M_{10}}{\hat{b}_1 L},$$

$$\Delta V_{M1} = k_{V1} \frac{M_{40G} - M_{40}}{\hat{a}_2 L} + k_{V2} \frac{M_{10G} - M_{10}}{\hat{b}_2 L};$$

若满足规则 R_2 的条件部分,则 G_G, V_{PG}^r 的调整量分别为

$$\Delta G_{M2} = k_{M3} \frac{M_{40G} + M_{M40} - M_{40}}{\hat{a}_1 L} + k_{M4} \frac{M_{10G} + M_{M10} - M_{10}}{\hat{b}_1 L},$$

$$\Delta V_{M2} = k_{V3} \frac{M_{40G} + M_{M40} - M_{40}}{\hat{a}_2 L} + k_{V4} \frac{M_{10G} + M_{M10} - M_{10}}{\hat{b}_2 L};$$

综合 R_1, R_2 , 得

$$\Delta G_G = \Delta G_{M1} + \Delta G_{M2}, \quad \Delta V_{PG}^r = \Delta V_{M1} + \Delta V_{M2}, \quad (12)$$

式中 $\Delta G_G, \Delta V_{PG}^r$ 为调整量; L 为计算步长,其选择影响计算的收敛性和收敛速度; k_{Mi}, k_{Vi} ($i=1, 2, 3, 4$) 为调整系数; M_{M40} 为 M_{40} 的最大允许值与 M_{40G} 之差; M_{M10} 为 M_{10G} 与 M_{10} 的最小允许值之差。

若满足规则 R_3, R_4 的条件部分,则 $A_p^g, S_{\text{Q}p}^g$ 分别调整为

$$A_p^g = \eta_c (A^g - \Delta A^g), \quad S_{\text{Q}p}^g = \frac{\eta_c}{\eta_s} (S_{\text{Q}}^g - \Delta S_{\text{Q}}^g). \quad (13)$$

由配合煤质量指标确定配煤比的原则是:取一实际配煤过程的配煤比经验值作为初值,根据配合煤质量预测模型(4)式计算配合煤质量指标 $G, V_p^r, S_{\text{Q}p}^g, A_p^g$, 判断是否满足规则 $R_5 \sim R_8$ 的条件部分,如满足,则按照规则 $R_5 \sim R_8$ 进行调整,否则用计算出来的配煤比验证是否可以得到符合要求的配合煤质量指标。调整算法为

$$X_i = X_i + \Delta X_i, \quad \Delta X_i = \frac{Y_G - Y}{L_x * \text{sgn}(Y_i - Y) * \sum_{i=1}^N Y_i}, \quad (14)$$

式中 ΔX_i 为调整量; Y 对应于配合煤质量指标 $G, V_p^r, S_{\text{Q}p}^g, A_p^g$; Y_i 对应于各单种煤质量指

标 $G_i, V_{di}, S_{Qdi}^s, A_{di}^s; L_x$ 为调整步长; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.

式(11) ~ (14)构成了配煤比计算的解析模型.

5 应用效果

ECS 由两台工业控制计算机 ESC、MMC 和 Honeywell S9000e 控制器实现,于1994年12月正式投入工厂运行. 长期运行表明,该系统工作可靠、性能稳定. 分析配煤流量历史趋势图可知,当扰动发生时,实际配煤流量能被快速调整至设定范围,配煤准确率由人工配煤时的60%上升到97%. 焦炭质量预测精度达到95%,其中 M_{40} 、 M_{10} 的相对误差最大为2.8%,最小为0.1%; A^s 的相对误差最大为4.3%,最小为0.6%; S_Q^s 的相对误差最大为4.8%,最小为3.1%,取得了满意的应用效果.

针对实际工业对象,如何切实提高专家控制系统的性能是目前人们所关注的难点问题,该系统给出了解决这一难点问题的一个成功事例.

参 考 文 献

- 1 费敏锐等. 智能控制方法的交叉综合及其应用. 控制理论与应用,1996,13(3):273~280
- 2 Astrom K J *et al.* Expert control. *Automatic*,1986,22(3):277~286
- 3 Chunhua Yang *et al.* Expert optimized control technique for electrolysis of zinc. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 1997,7(4):133~137
- 4 黄席樾等. 冶金连铸工业过程实时专家控制系统的设计与实现. 自动化学报,1998,24(3):405~409
- 5 何磊,戴冠中. 分级递阶专家智能控制及其在加氢裂化生产反应过程中的应用. 信息与控制,1995,24(6):338~342
- 6 戴汝为等. 智能系统的综合集成. 杭州:浙江科学技术出版社,1995. 5~15
- 7 涂亚庆,李组枢. 一种新型的仿人智能控制器的设计方法. 自动化学报,1994,20(5):616~621
- 8 姚昭章. 炼焦学. 北京:冶金工业出版社,1995. 57~72

阳春华 1965年生,1988年于中南工业大学自动控制工程系获硕士学位. 现为中南工业大学信息科学与工程学院副教授、博士生. 主要研究方向为人工智能及其应用、智能控制、专家控制、生产过程控制.

沈德耀 1936年生,1957年毕业于东北工学院机电系. 现为中南工业大学信息科学与工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为交流调速、智能控制、集散控制与过程控制.

吴 敏 1963年生,工学博士、教授、博士生导师. 1986年研究生毕业于中南工业大学信息科学与工程学院,并留校工作至今. 1989年至1990年为日本东北大学访问学者,1996年至1999年作为客员研究员在东京工业大学进行合作研究,并获博士学位. 研究领域为过程控制,鲁棒控制,智能控制,非线性控制和数字控制.

刘健勤 1964年生. 1987年于西安交通大学自动控制工程系获硕士学位,1997年于中南工业大学信息科学与工程学院获博士学位. 曾为日本理光公司研究开发本部信息与通信研究所客座研究员,现为中南工业大学信息科学与工程学院副教授. 主要研究方向为人工生命、进化计算、混沌动力学与模式识别.